Compte-rendu de l'atelier régional sur les résultats du Programme de services d'adaptation aux changements climatiques en milieu aquatique

Christine Desjardins

Pêches et Océans Canada
Institut Maurice-Lamontagne
850, route de la Mer, C.P. 1000
Mont-Joli, Québec
Canada G5H 3Z4

2018

Rapport manuscrit canadien des sciences halieutiques et aquatiques 3158

Fisheries and Oceans Canada | Pêches et Océans Canada

Canada

Rapport manuscrit canadien des sciences halieutiques et aquatiques

Les rapports manuscrits contiennent des renseignements scientifiques et techniques qui constituent une contribution aux connaissances actuelles, mais qui traitent de problèmes nationaux ou régionaux. La distribution en est limitée aux organismes et aux personnes de régions particulières du Canada. Il n'y a aucune restriction quant au sujet; de fait, la série reflète la vaste gamme des intérêts et des politiques de Pêches et Océans Canada, c'est-à-dire les sciences halieutiques et aquatiques.

Les rapports manuscrits peuvent être cités comme des publications à part entière. Le titre exact figure au-dessus du résumé de chaque rapport. Les rapports manuscrits sont résumés dans la base de données *Résumés des sciences aquatiques et halieutiques.*

Les rapports manuscrits sont produits à l'échelon régional, mais numérotés à l'échelon national. Les demandes de rapports seront satisfaites par l'établissement auteur dont le nom figure sur la couverture et la page du titre.

Les numéros 1 à 900 de cette série ont été publiés à titre de Manuscrits (série biologique) de l'Office de biologie du Canada, et après le changement de la désignation de cet organisme par décret du Parlement, en 1937, ont été classés comme Manuscrits (série biologique) de l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada. Les numéros 901 à 1425 ont été publiés à titre de Rapports manuscrits de l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada. Les numéros 1426 à 1550 sont parus à titre de Rapports manuscrits du Service des pêches et de la mer, ministère des Pêches et de l'Environnement. Le nom actuel de la série a été établi lors de la parution du numéro 1551.

Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences

Manuscript reports contain scientific and technical information that contributes to existing knowledge but which deals with national or regional problems. Distribution is restricted to institutions or individuals located in particular regions of Canada. However, no restriction is placed on subject matter, and the series reflects the broad interests and policies of Fisheries and Oceans Canada, namely, fisheries and aquatic sciences.

Manuscript reports may be cited as full publications. The correct citation appears above the abstract of each report. Each report is abstracted in the data base *Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts.*

Manuscript reports are produced regionally but are numbered nationally. Requests for individual reports will be filled by the issuing establishment listed on the front cover and title page.

Numbers 1-900 in this series were issued as Manuscript Reports (Biological Series) of the Biological Board of Canada, and subsequent to 1937 when the name of the Board was changed by Act of Parliament, as Manuscript Reports (Biological Series) of the Fisheries Research Board of Canada. Numbers 1426 - 1550 were issued as Department of Fisheries and Environment, Fisheries and Marine Service Manuscript Reports. The current series name was changed with report number 1551.

Rapport manuscrit canadien des
sciences halieutiques et aquatiques 3158

2018

Compte-rendu de l'atelier régional sur les résultats du Programme de services d'adaptation aux changements climatiques en milieu aquatique

par

Christine Desjardins

Direction régionale des sciences
Pêches et Océans Canada
Institut Maurice-Lamontagne
850 route de la Mer, C.P. 1000,
Mont-Joli, Québec
Canada G5H 3Z4

© Sa Majesté la Reine du Chef du Canada, 2018

Cat. No. Fs97-4/3158F-PDF ISBN 978-0-660-27298-6 ISSN 1488-5468

On doit citer la publication comme suit:

Desjardins, C. 2018. Compte-rendu de l'atelier régional sur les résultats du Programme de services d'adaptation aux changements climatiques en milieu aquatique. Rapp. manus. can. sci. halieut. aquat. 3158: iv+40 pp.

TABLE DES MATIÈRES

Page

RÉSUMÉ iv

ABSTRACT iv

CONTEXTE 1

INTRODUCTION 1

COMPTE-RENDU DE L'ATELIER 2

BLOC I – RISQUES AUX INFRASTRUCTURES 2

Aperçu des présentations 2

Résumé des discussions en plénière 3

BLOC II – MODÉLISATION ET IMPACTS PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES 3

Aperçu des présentations 3

Résumé des discussions en plénière 4

BLOC III – IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES RESSOURCES MARINES 4

Aperçu des présentations 4

Résumé des discussions en plénière 4

BLOC IV – OUTILS D'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES 6

Aperçu des présentations 6

Résumé des discussions en plénière 6

BLOC V – IMPLICATIONS DES RÉSULTATS DU PROGRAMME POUR LES CLIENTS RÉGIONAUX 7

Direction des ports pour petits bateaux 7

Garde côtière canadienne 8

Direction régionale de la gestion des écosystèmes 8

Direction régionale de la gestion des pêches 9

BLOC VI – PLANIFICATION DU RENOUVELLEMENT DU PROGRAMME SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES 10

RÉFÉRENCES 12

REMERCIEMENTS 12

ANNEXE 1 : LISTE DES PARTICIPANTS 13

ANNEXE 2 : ORDRE DU JOUR 15

ANNEXE 3 : RÉSUMÉS DES PRÉSENTATIONS 18

RÉSUMÉ

Un atelier régional portant sur le Programme de services d'adaptation aux changements climatiques en milieu aquatique (PSACCMA) (2011-2016) s'est tenu les 8 et 9 février 2017 à Mont-Joli, Québec. L'objectif poursuivi par cet atelier visait à clore la première phase du programme et à préparer son renouvellement. En tout, dix-sept présentations, réparties entre quatre grands thèmes, ont eu lieu : 1) risques aux infrastructures, 2) modélisation et impacts physiques et chimiques des changements climatiques, 3) impacts des changements climatiques sur les ressources marines et 4) outils d'adaptation aux changements climatiques. Par la suite, les différents clients régionaux ont discuté de leurs besoins en matière d'adaptation, de l'implication des résultats sur leurs activités respectives et des lacunes identifiées. La plénière finale a permis aux participants d'arriver à un consensus sur les thématiques à prioriser lors du renouvellement du programme.

ABSTRACT

A regional workshop on the Aquatic Climate Change Adaptation Services Program (ACCASP) (2011-2016) was held on February 8 and 9, 2017 in Mont-Joli, Quebec. The aim of the workshop was to close the first phase of the Program and prepare for its renewal. A total of seventeen presentations were held, divided into four main themes: 1) infrastructure risks; 2) physical / chemical modelling of climate change; 3) impacts of climate change on marine resources; and 4) adaptation tools. Subsequently, each of the regional clients discussed their need for adaptation to climate change, the implication of the results of their respective activities and identified gaps. The final plenary session allowed the participants to reach a consensus on the themes to be prioritized during the renewal of the Program.

CONTEXTE

Le Programme de services d'adaptation aux changements climatiques en milieu aquatique (PSACCMA) est un programme quinquennal qui a débuté en 2011 à Pêches et Océans Canada (MPO). Les objectifs du programme étaient de mieux comprendre les impacts des changements climatiques sur les écosystèmes aquatiques et d'adapter les programmes et services du MPO en conséquence. Une évaluation préliminaire des risques au niveau des activités du ministère (MPO 2005), mise à jour en 2012 (MPO 2012a), a servi de fondement à cette première phase du programme.

Le programme a été conduit en deux parties. Pour faire suite à l'évaluation des risques au niveau national, la première partie du programme a commencé par la réalisation d'une série d'évaluations de risques spécifiques pour chacun des quatre grands bassins aquatiques, soit : le Pacifique, l'Arctique, les Eaux intérieures (Grands Lacs et Prairies) et l'Atlantique. Pour la région de l'Atlantique, dont la région du Québec fait partie, l'évaluation du risque a été publiée en 2012 (MPO 2012b). Elle s'est appuyée sur une publication décrivant les tendances et les projections climatiques (Loder *et al.* 2013) ainsi que sur une publication décrivant les impacts, les vulnérabilités et les opportunités en lien avec les changements climatiques sur les espèces aquatiques marines et l'écosystème ainsi que sur les services de nature « non écosystémique » rendus par le MPO comme le maintien d'infrastructures portuaires et de voies navigables sécuritaires (Schackell *et al.* 2013).

La deuxième partie du programme visait deux objectifs particuliers, soit : 1) le développement de projets de recherche permettant d'acquérir de nouvelles connaissances scientifiques afin d'améliorer la compréhension des répercussions des changements climatiques sur les infrastructures, les habitats, les écosystèmes et les ressources halieutiques et 2) la conception d'outils d'adaptation aux changements climatiques axés sur la science et pouvant être utilisés par les décideurs ministériels lors de l'exécution des programmes destinés au public. Plusieurs ateliers de consultations et de planification ont eu lieu au sein de la Direction régionale des sciences, en collaboration avec les partenaires internes des secteurs du MPO concernés par le programme, notamment la Direction des ports pour petits bateaux, la Garde côtière canadienne, la Direction de la gestion des pêches et la Direction régionale de la gestion des écosystèmes. Ces ateliers ont permis de planifier et de développer des projets de recherche arrimés aux besoins des clients.

INTRODUCTION

L'atelier régional sur le Programme de services d'adaptation aux changements climatiques en milieu aquatique (PSACCMA) s'est tenu les 8 et 9 février 2017 à l'Institut Maurice-Lamontagne (Mont-Joli, Québec). Cet atelier constituait l'aboutissement des travaux réalisés durant la deuxième partie du programme, pour la région du Québec. Il avait pour objectif d'intégrer les sciences de l'adaptation aux changements climatiques dans les processus décisionnels des

différents secteurs du MPO dont les mandats sont liés aux écosystèmes (pêches, océans, protection des pêches, aquaculture, espèces en péril) et les autres responsabilités de nature « non écosystémique » (navigation sécuritaire, ports pour petits bateaux, biens immobiliers). La liste des participants et l'ordre du jour de cet atelier se trouvent respectivement aux annexes 1 et 2.

Plusieurs appels de projets ont été lancés au cours des cinq dernières années. Un total de 16 projets de recherche ont été financés dans la région du Québec entre 2011 et 2015. Le présent document est un compte-rendu de la rencontre entre scientifiques et clients au cours de laquelle les résultats de ces projets de recherche ont été présentés. Les présentations ont été regroupées sous quatre grands thèmes, soit : 1) les risques aux infrastructures, 2) la modélisation et les impacts physiques et chimiques des changements climatiques, 3) les impacts des changements climatiques sur les ressources marines, et 4) les outils d'adaptation aux changements climatiques.

Le compte-rendu reprend l'ordre de présentation des thématiques (blocs) figurant à l'ordre du jour de l'atelier (Annexe 2). Pour chacun de ces blocs, on trouve un aperçu des sujets présentés et un compte-rendu des discussions qui ont suivi les présentations (Blocs I à IV). Le bloc V présente les commentaires émis par chacun des clients régionaux présents à la rencontre quant à leurs besoins en matière d'adaptation, l'implication des résultats sur leurs activités respectives et les lacunes identifiées, s'il y a lieu. Le bloc VI reprend les discussions ayant eu lieu durant la plénière finale de l'atelier portant sur le renouvellement du programme. Ce dernier bloc contient une liste des sujets de recherche qui pourraient être priorisés lors du renouvellement du programme puisqu'ils ont fait consensus entre les participants. Il contient l'essentiel des points qui ont été amenés et discutés au fil des blocs précédents et qui répondent aux principaux besoins et lacunes identifiés au cours de l'atelier. En annexe, on retrouve la liste des participants (Annexe 1), l'ordre du jour de la rencontre (Annexe 2), puis les résumés des présentations faites durant la rencontre ainsi que les projets de recherche plus spécifiques proposés par chacun des présentateurs pour le renouvellement du programme (Annexe 3).

COMPTE-RENDU DE L'ATELIER

BLOC I – RISQUES AUX INFRASTRUCTURES

Aperçu des présentations

Le bloc 1 a été consacré à la présentation des projets traitant de l'utilisation de modèles climatiques afin de projeter l'évolution des niveaux d'eau moyens et extrêmes (ondes de tempêtes). Les présentations ont porté sur 1) la hausse du niveau relatif de la mer et le calcul des tolérances verticales ainsi que sur 2) la projection des hauteurs d'eau extrêmes et de la période de retour des ondes de

tempêtes. Ces projections pourraient servir à améliorer la conception des ouvrages côtiers et accroître leur longévité malgré les hausses anticipées dans le niveau des eaux et la fréquence des événements extrêmes.

Résumé des discussions en plénière

Du point de vue des clients concepteurs d'ouvrages, l'augmentation probable des niveaux d'eau et de la fréquence des ondes de tempête est déjà intégrée, mais ces deux composantes constituent une fraction des éléments dont il faut tenir compte dans la conception d'infrastructures de protection en milieu côtier. Parmi les autres paramètres qui sont intégrés lors de la conception, on retrouve la présence ou non d'un couvert de glace, la hauteur des vagues, la direction d'où viennent les tempêtes, leur fréquence, etc. La principale difficulté rencontrée actuellement se trouve dans l'évaluation/modélisation de l'effet d'amplification provoqué par la conjoncture de ces différents paramètres.

La gestion d'ouvrages en milieu côtier doit également tenir compte du transport sédimentaire. L'implantation d'une structure modifie celui-ci en créant des zones d'érosion et d'accumulation de part et d'autre des ouvrages. Cette connaissance est importante. Un participant fait mention de l'existence d'un groupe de recherche, à l'extérieur du MPO, qui se penche sur les questions liées à la géomorphologie et l'érosion côtière. Ces initiatives, externes au MPO, devraient être bien documentées afin d'éviter une redondance dans les projets de recherche financés ou donner des opportunités de collaboration.

Un dernier point abordé en plénière est la question de la période utilisée pour faire les projections. Celle-ci doit en effet être plus longue que la longévité souhaitée pour l'infrastructure, mais doit aussi tenir compte d'autres impératifs comme les besoins des utilisateurs. Une infrastructure portuaire élevée pour contrer la hausse du niveau des eaux prévue sur une période de cent ans pourrait, par exemple, nuire à l'amarrage des bateaux.

BLOC II – MODÉLISATION ET IMPACTS PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Aperçu des présentations

Les présentations du bloc 2 ont traité de l'utilisation de modèles afin de projeter les impacts que pourraient avoir les changements climatiques sur certaines propriétés physiques et chimiques des masses d'eau pour les régions de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent, du plateau néo-écossais et du golfe du Maine. Ces projections pourraient servir à documenter, par exemple, les changements potentiels aux habitats de différentes espèces (ex. commerciales, en péril, envahissantes, etc.). Les projets se sont penchés respectivement sur les impacts des changements climatiques sur : 1) le climat océanique physique, 2) la biogéochimie, 3) l'oxygène dissous dans les chenaux profonds, et 4) les conditions de glace.

Résumé des discussions en plénière

Suite aux présentations du bloc 2, des discussions générales ont traité de la validation et de la résolution des modèles utilisés. Dans l'ensemble, les modèles ont été jugés suffisamment robustes et validés par les données existantes. Du travail reste à faire cependant au niveau du raffinement de ces modèles. On a donné l'exemple de la modélisation des bilans d'évaporation/précipitation qui seraient différents dans le nord et le sud du Golfe et pour lesquels un projet de recherche a déjà été entrepris. Un participant a également cité en exemple la nécessité de raffiner la modélisation du comportement de la couche intermédiaire froide, de grande importance pour la biologie. Quant aux modélisations à petite échelle en milieu côtier, elles fonctionnent très bien, surtout dans les baies, car il est souvent possible de valider les modèles avec de longues séries de données acquises dans le cadre d'autres projets (ex. aquaculture). La séance s'est conclue en reconnaissant que la standardisation et l'intégration des différentes approches sont jugées souhaitables et devraient être poursuivies.

BLOC III – IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES RESSOURCES MARINES

Aperçu des présentations

Cette section était dédiée aux projets explorant les liens entre les changements observés ou projetés des variables physico-chimiques du milieu aquatique et de l'impact de ces changements sur les composantes biologiques. Entre autres, ce volet visait à identifier les modifications susceptibles de se produire quant à la répartition, la productivité ou la physiologie des espèces, le moment où de telles modifications pourraient se produire et les principaux facteurs mis en cause, puis à déterminer comment ces informations pourraient être intégrées dans les pratiques actuelles du MPO. Les présentations ont porté plus spécifiquement sur : 1) l'impact de l'acidification des eaux sur la production primaire dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, 2) l'impact de l'acidification des eaux sur la crevette nordique dans l'écosystème marin du Saint-Laurent, 3) l'impact des variations environnementales observées à différentes périodes sur des composantes de l'écosystème pélagique (zooplancton, poissons pélagiques, mammifères marins), 4) le développement de modèles statistiques de distribution servant à inférer la distribution et l'habitat optimal d'espèces pélagiques à des fins prédictives, 5) la productivité du crabe des neiges en situation de changements climatiques et 6) la productivité de la morue en situation de changements climatiques.

Résumé des discussions en plénière

D'entrée de jeu, il est mentionné qu'il reste beaucoup de travail à faire pour répondre à cet objectif. Actuellement, on commence à avoir une bonne idée des impacts des changements climatiques sur les stades adultes des espèces étudiées, mais le système est autrement plus complexe. Des participants ont

recommandé l'inclusion des autres stades de vie (larves et juvéniles) ainsi que l'examen de l'influence des liens trophiques. Un modèle serait actuellement disponible et permettrait d'inclure plusieurs stades de vie différents d'une même espèce, même si celle-ci possède un stade pélagique et un stade benthique. Le modèle DEB (*Dynamic energy budget*) pourrait constituer une avenue intéressante à explorer dans le futur.

La question du type d'approche (multispécifique vs monospécifique) la plus appropriée pour l'étude des impacts des changements climatiques sur les ressources marines a aussi été discutée. L'approche multispécifique, par exemple, est utilisée aux États-Unis. Celle-ci est considérée comme adéquate pour étudier des questions liées aux relations trophiques, mais elle mène à des conclusions générales, non quantitatives, difficiles à intégrer dans des décisions de gestion, notamment pour l'évaluation des stocks. L'approche actuelle utilisée par le MPO met plutôt l'emphase sur l'écologie d'une espèce et tente de cerner les facteurs qui auront une influence plus déterminante sur la productivité de celle-ci. Comme mentionné précédemment, il faut toutefois poursuivre le travail en intégrant de nouveaux facteurs et de nouvelles dimensions aux modèles (cycle de vie complet, prédation, etc.). Le travail effectué sur le crabe des neiges est un bon exemple de l'approche à suivre où plusieurs stades de vie ont été étudiés. À long terme, on doit viser à intégrer dans les modèles existants les différentes composantes du cycle vital d'une espèce ainsi que les liens qu'elle entretient avec son environnement pour en arriver à une meilleure prédiction de l'évolution des stocks commerciaux.

Une participante a mentionné également que pour bien répondre aux questionnements touchants les impacts des changements climatiques, il faudrait mieux définir la période de temps d'intérêt pour les clients. Les résultats des modèles peuvent varier dans le temps. Par exemple, on peut observer une tendance à la hausse d'un paramètre sur trente ans, mais à la baisse sur soixante-dix ans.

Aucun projet n'a traité spécifiquement du milieu côtier, mais celui-ci ne doit pas être négligé, car il est partie intégrante de la problématique. De nombreux gisements d'espèces commerciales sont présents en milieu côtier (ex. mactre de Stimpson, mye commune, etc.). De nombreux organismes benthiques y vivent et constituent des maillons importants de la chaîne trophique. Des participants ont également mentionné les conséquences d'une tempête particulièrement forte qui a causé la mortalité de nombreux organismes côtiers et se sont interrogés sur l'impact de ce phénomène sur la ressource, étant donné que la fréquence de ce type d'événement est appelée à augmenter.

BLOC IV – OUTILS D'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Aperçu des présentations

Le dernier bloc regroupait des présentations de projets qui visent le développement d'outils en soutien à la gestion sur différentes questions liées aux changements climatiques. Les outils présentés concernaient : 1) le développement de modèles numériques de terrain haute-résolution pour la zone intertidale et l'eau peu profonde, 2) le développement d'un modèle régional du climat qui incorpore la biogéochimie dans le but de fournir une analyse spatiale détaillée des conditions biogéochimiques futures, 3) le développement d'un indicateur améliorant la détermination du début de la migration printanière du homard vers la côte et 4) l'intégration de paramètres environnementaux et écologiques dans les évaluations de stocks d'espèces d'importance commerciale.

Résumé des discussions en plénière

En raison d'un échéancier serré, aucune discussion n'a eu lieu à la suite à ce bloc de présentations. Cependant, des discussions ont eu lieu après chaque présentation et les participants ont démontré un grand intérêt pour tous les outils développés.

La première présentation a porté sur l'utilisation des technologies LiDAR et PhoDAR pour la réalisation de modèles numériques de terrain à haute résolution. Des discussions ont eu lieu concernant d'autres initiatives du même ordre et l'accessibilité des données. Le SHC a mentionné que le Ministère des ressources naturelles du Canada (RNCAN) travaille actuellement à rendre disponibles toutes les données LiDAR récoltées en sol canadien, incluant les données générées par les provinces. Le SHC a également collaboré avec le Ministère de la sécurité civile du Québec en 2015 pour la collecte de données LiDAR dans le secteur de Manicouagan. Des participants se sont montrés intéressés à savoir s'il était possible de caractériser les différents types d'habitats côtiers, notamment le substrat et les herbiers, à l'aide de cette technologie ce qui est effectivement possible.

La deuxième présentation portait sur le développement d'un modèle régional du climat qui incorpore la biogéochimie. L'outil développé est le modèle en tant que tel qui pourra servir à appuyer non seulement les projections futures quant à la distribution des espèces en relation avec les paramètres environnementaux, mais également le développement d'indicateurs de suivi pour les aires marines protégées. Des participants ont tenu à souligner la complexité relative de ce type de modèle par rapport aux modèles purement physiques puisqu'ils comprennent un nombre plus important de variables.

L'outil développé pour aider la prédiction de la migration printanière du homard et l'ouverture de la pêche a suscité également beaucoup de commentaires. Cette approche pourrait être utilisée pour obtenir des renseignements sur d'autres

périodes critiques du cycle de vie du homard. Elle pourrait également servir, dans le futur, à la Direction de la protection des pêches qui a des enjeux au niveau des périodes de restriction s'appliquant aux travaux effectués dans l'eau. Concernant son utilisation future, des présentations ont déjà été faites auprès du comité consultatif ainsi qu'aux pêcheurs ce qui mènera éventuellement à son intégration aux pratiques actuelles de gestion des activités de pêche.

Les deux dernières présentations portaient sur l'utilisation de modèles permettant de définir l'habitat préférentiel actuel et l'habitat potentiel prédit de trois espèces d'eaux froides, soit le turbot, la crevette nordique et la morue franche. Les paramètres environnementaux considérés sont la température, la profondeur et l'oxygène dissous. Les résultats seront utilisés dans le cadre des futures évaluations des stocks et permettront de faire des recommandations au regard de la distribution actuelle de ces espèces et les projections futures et à l'impact de ces changements sur les pêcheries dans un contexte de réchauffement climatique.

BLOC V – IMPLICATIONS DES RÉSULTATS DU PROGRAMME POUR LES CLIENTS RÉGIONAUX

Suite aux présentations scientifiques, une deuxième partie de l'atelier visait à tirer des constats et à faire l'intégration des connaissances acquises. Cette synthèse devrait permettre de mieux cibler les travaux de recherche qui seront entrepris dans la prochaine phase du programme et de répondre aux besoins qui n'ont pas encore été comblés.

Avant la tenue de la plénière finale, chaque client a eu l'opportunité de commenter les travaux présentés par rapport à ses propres enjeux de gestion.

Direction des ports pour petits bateaux

La conception des ouvrages de protection en milieu côtier tient déjà compte de certains paramètres qui sont appelés à évoluer avec les changements climatiques, comme la hausse des niveaux d'eau. Les besoins identifiés pour améliorer la conception et la gestion des infrastructures portent sur : 1) l'obtention d'une meilleure concordance entre les paramètres, notamment entre les niveaux d'eau et les surcotes de tempêtes, 2) l'intégration de nouveaux paramètres comme le transport sédimentaire, 3) l'amélioration de la résolution des modèles (échelle plus fine) et 4) l'utilisation de modèles pour documenter le changement dans la répartition potentielle des espèces commerciales. Ce dernier point aiderait à mieux prédire les besoins émergents des pêches, notamment en ce qui a trait à la construction de nouveaux ports de pêche et l'augmentation de la taille des bateaux. Cela permettrait aussi d'améliorer la projection des dates d'ouverture de pêche qui ont une influence sur la gestion des activités de dragage, de l'entretien des infrastructures et des périodes de restriction.

Garde côtière canadienne

Absente de la rencontre.

Direction régionale de la gestion des écosystèmes

Le mandat de la direction régionale de la gestion des écosystèmes (DRGÉ) est lié à des problématiques touchant la gestion des activités humaines dans les écosystèmes marins et d'eau douce au Canada. Elle comprend quatre divisions, dont trois d'entre elles ont un lien direct avec une loi canadienne, citée entre parenthèses : la gestion des espèces en péril (*Loi sur les espèces en péril*), la protection des pêches (*Loi sur les pêches*) et la gestion des océans (*Loi sur les océans*). L'évaluation des impacts des activités humaines ainsi que la conservation et la protection des ressources sont au cœur du travail des professionnels œuvrant dans ces domaines et leurs décisions sont fondées sur les connaissances scientifiques.

Pour la DRGÉ, les besoins ne se trouvent pas tant au niveau de l'adaptation des programmes, mais plutôt dans l'obtention d'une information scientifique de qualité et pertinente qui va venir appuyer la prise de décision. Règle générale, une description des habitats et des espèces, accompagnée d'une bonne évaluation des risques, des impacts et des incertitudes associées constituent les éléments essentiels à la prise de décision en gestion. Par exemple, la Division de la protection des pêches évalue beaucoup de projets de développement en milieu côtier. Les impacts sur ce milieu doivent être évalués en termes de perte de productivité des habitats puis compensés de manière proportionnelle lorsqu'il y a un dommage sérieux avéré. Pour la Division de la gestion des océans (DGO), il est important de connaître les changements anticipés de l'écosystème afin de mieux cibler les objectifs de conservation ainsi que les indicateurs appropriés pour l'établissement d'aires marines protégées. Pour la Division de la gestion des espèces en péril (DGEP), la science est déjà très impliquée à plusieurs niveaux de la gestion des espèces en péril (ex. inscription, programme de rétablissement). Cependant, le travail doit se poursuivre quant à la modélisation des habitats, notamment chez les mammifères marins, ainsi que pour mieux documenter les impacts.

Les besoins identifiés par la DRGÉ comprennent l'amélioration de l'accès aux différentes connaissances acquises par les scientifiques sur les changements anticipés à l'écosystème en raison des changements climatiques. On souhaite mieux connaître les impacts à venir, mais également les probabilités que les événements projetés par les modèles se réalisent. Ce besoin pourrait être comblé par l'ajout aux avis scientifiques d'un volet écosystémique ainsi qu'un volet prédictif mentionnant l'évolution des systèmes en raison des changements climatiques.

Direction régionale de la gestion des pêches

La Direction régionale de la gestion des pêches (DRGP) vise à assurer la viabilité à long terme et le développement durable des espèces sauvages ou aquacoles tout en contribuant à la prospérité économique des secteurs des pêches et de l'aquaculture dans les eaux marines au Québec. Les implications des changements climatiques sont multiples pour la DRGP et des pistes sont proposées pour mieux gérer ces changements à venir.

L'adaptation des programmes de la DRGP aux changements climatiques nécessite essentiellement une meilleure connaissance des impacts anticipés sur la distribution, le cycle de vie, la physiologie ou la productivité des stocks faisant l'objet d'une exploitation commerciale.

Par exemple, les modifications de certains paramètres physico-chimiques de la colonne d'eau et du fond, comme la diminution du pH (acidification) et de l'oxygène dissous (hypoxie), peuvent affecter la formation des coquilles chez les bivalves ou la répartition des espèces. En milieu côtier, on mentionne également l'augmentation de l'érosion côtière (conséquence de la hausse des niveaux d'eau et de la diminution du couvert de glace) qui pourrait potentiellement affecter la répartition ou la productivité des bancs coquilliers.

Une modification dans la répartition des espèces pourrait avoir des implications dans la gestion des activités de pêche. Pouvoir anticiper le déplacement d'une zone de pêche en raison du changement de répartition d'une espèce permettrait de prendre des décisions de gestion plus éclairées. Cela pourrait aussi faciliter la gestion intégrée des activités de pêche et de l'établissement d'aires marines protégées, ces dernières étant généralement implantées pour un long terme. On mentionne également le cas des mammifères marins dont la gestion transfrontalière avec les États-Unis nécessite aussi de bons outils de gestion.

Il existe également des opportunités à saisir; certaines espèces, actuellement peu présentes dans nos régions, pourraient à l'avenir atteindre un seuil de rentabilité intéressant d'un point de vue commercial en raison du réchauffement des masses d'eau et de leur déplacement vers le nord. On mentionne que l'anticipation de ces pêcheries émergentes serait souhaitable.

Enfin, l'ajout d'informations sur les changements écosystémiques observés et anticipés en raison des changements climatiques dans les avis scientifiques serait utile à la gestion. Cela faciliterait la communication de ces enjeux aux pêcheurs et améliorerait de façon générale la gestion durable des pêches. Des analyses socio-économiques plus poussées sur l'impact de ces changements pourraient venir s'ajouter à cette démarche. Le développement d'indicateurs pour faire le suivi, par exemple, des espèces ou de la productivité représente aussi une avenue intéressante.

BLOC VI – PLANIFICATION DU RENOUVELLEMENT DU PROGRAMME SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

L'atelier s'est conclu par une plénière où l'on a discuté des lacunes identifiées et des avenues de recherche proposées par les clients et les experts afin de préparer le renouvellement du Programme de services d'adaptation aux changements climatiques. La priorisation des différents enjeux soulevés ainsi que de leur possible intégration au programme, soit au sein de nouveaux projets ou de projets existants, a été discutée. Sept grands thèmes ont été retenus :

1) Poursuivre les travaux sur les impacts de l'acidification des eaux sur les organismes, et ce, autant du point de vue de la modélisation et des projections que du point de vue des effets sur les organismes eux-mêmes.

2) Procéder à une étude de cas qui permettrait l'intégration, aux avis scientifiques et aux plans de gestion actuels, des résultats obtenus dans le cadre du Programme de services d'adaptation aux changements climatiques. L'intégration de diverses expertises est souhaitée par les intervenants, mais la consolidation de toute cette information représente un défi puisqu'il faut trouver une façon de faire qui soit pertinente et efficace. L'étude de cas pourrait porter sur une espèce commerciale bien connue et pour laquelle les connaissances empiriques sont déjà bien avancées.

3) Mettre à profit les installations aquicoles de l'institut Maurice-Lamontagne pour faire avancer les connaissances sur les impacts individuels et cumulatifs des variations anticipées de certains facteurs physico-chimiques sur les organismes aquatiques.

4) Améliorer et régionaliser les modèles numériques. Affiner l'échelle de ces modèles pourrait permettre de mieux répondre aux besoins de la protection des infrastructures ou des questions touchant l'écosystème côtier en général.

5) Favoriser l'émergence de projets en milieu côtier. On mentionne plusieurs idées qui pourraient faire l'objet de projets de recherche ciblés répondant aux besoins du Programme de services d'adaptation aux changements climatiques tout en améliorant la connaissance fondamentale du milieu côtier. Par exemple, il est proposé d'étudier le déplacement du homard vers le nord et l'ouverture potentielle de nouvelles zones de pêche, la régionalisation des modèles numériques pour la protection des infrastructures ou l'étude des espèces envahissantes en général ou en lien, par exemple, avec les champs de laminaires.

6) Favoriser les opportunités de partenariat et de réseautage à l'extérieur du MPO. Par exemple, la géomorphologie côtière et l'étude du transport sédimentaire, qui constituent des champs d'expertise non présents au MPO, pourraient complémenter la modélisation physique lors de la construction, de la réfection ou de la protection des infrastructures en milieu côtier.

7) Identifier les problématiques émergentes ainsi que les opportunités en matière de pêcheries. Ce point vise à améliorer les connaissances au sujet des espèces dont l'aire de répartition risque de changer en raison des changements climatiques. On souhaite ainsi mieux identifier les espèces qui connaîtront un déclin, celles dont on anticipe l'essor et qui pourraient constituer des pêcheries émergentes ainsi que les menaces représentées par les espèces envahissantes, les algues toxiques et les pathogènes.

Des commentaires généraux sont ensuite émis par rapport à ces points en particulier et sur l'atelier en général. On mentionne notamment que :

- Une meilleure connaissance des risques et des incertitudes associées (probabilités et conséquences qu'un impact se produise) ainsi que l'élaboration d'un cadre de gestion de risque pourraient améliorer et aider à soutenir le processus décisionnel pour la Direction de la gestion des écosystèmes.
- Poursuivre la recherche fondamentale sur la biologie des espèces est essentiel et implicite à l'utilisation de modèles performants.
- La résilience des espèces peut constituer un facteur dont il faut tenir compte dans l'évaluation de la vulnérabilité aux changements anticipés.
- La connectivité des populations marines peut être influencée par les changements climatiques.

RÉFÉRENCES

Loder, J.W., Han, G., Galbraith, P.S., Chassé, J. et A. van der Baaren (Éds.). 2013. Aspects of climate change in the Northwest Atlantic off Canada. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 3045: x + 190 p.

MPO. 2005. Rapport d'évaluation des risques associés aux changements climatiques. [en ligne]. Disponible à http://www.dfo-mpo.gc.ca/science/oceanography-oceanographie/accasp-psaccma/profile-2005-eng.html

MPO. 2012a. Profil national des risques associés aux changements climatiques – Mise à jour 2012. [en ligne]. Disponible à http://www.dfo-mpo.gc.ca/science/oceanography-oceanographie/accasp-psaccma/profile-2012-fra.html

MPO. 2012b. Évaluation fondée sur les risques des impacts et des menaces que les changements climatiques présentent pour l'infrastructure et les systèmes biologiques qui relèvent du mandat de Pêches et Océans Canada – Grand bassin aquatique de l'Atlantique. Secr. can. de consult. sci. du MPO. Rép. des Sci. 2012/044

Shackell, N.L., Greenan, B.J.W., Pepin, P., Chabot, D., et A. Warburton (Éds.). 2013. Climate Change Impacts, Vulnerabilities and Opportunities. Analysis of the Marine Atlantic Basin. Can. Manuscr. Rep. Fish. Aquat. Sci. 3012: xvi + 366 p.

REMERCIEMENTS

Remerciement à Gilles Olivier qui a présidé l'atelier ainsi qu'aux deux réviseurs du document, Dominique Hamel et Yanick Gendreau.

ANNEXE 1 : LISTE DES PARTICIPANTS

Président :
Gilles Olivier

Responsables du programme :
Michel Gilbert, Directeur des sciences pélagiques et écosystémiques (DSPE)

Présentateurs:
Denis Chabot, Chercheur scientifique DSDB
Joël Chassé, Chercheur scientifique DSPE
Roger Côté, Gestionnaire au Service hydrographique du Canada
Peter Galbraith, Chercheur scientifique DSPE
Denis Gilbert, Chercheur scientifique DSPE
Yvan Lambert, Directeur des sciences démersales et benthiques (DSDB)
Diane Lavoie, Chercheuse scientifique DSPE
Denis Lefaivre, Chercheur scientifique DSPE
Stéphane Plourde, Chercheur scientifique DSPE
Bernard Sainte-Marie, Chercheur scientifique DSDB
Claude Savenkoff, Chercheur scientifique DSDB
Michel Starr, Chercheur scientifique DSPE

Clients :
Gordon Walsh, Directeur de la Direction régionale de la gestion des écosystèmes (DRGÉ)
François Hazel, Biologiste à la DRGÉ
Elizabeth Marceau, Ingénieure principale à la Direction des ports pour petits bateaux
Suzie Boudreau, Gestionnaire à la Direction régionale de la gestion des pêches (DRGP)
Mathieu Morin, DRGP

Rapporteuses :
Christine Desjardins
Dominique Hamel

Autres intervenants :
**La liste n'est pas exhaustive. Elle comprend seulement les participants étant intervenus pendant les plénières.*

Yves de Lafontaine, Directeur régional des sciences
Hugo Bourdages
Claude-André Cloutier
Catherine Couillard
Yanick Gendreau
Chris McKindsey

Serge Proulx
Virginie Roy
Michael Scarratt
Nathalie Simard

ANNEXE 2 : ORDRE DU JOUR

ATELIER RÉGIONAL SUR LES RÉSULTATS DU PROGRAMME D'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES DU MPO

Institut Maurice-Lamontagne, 8-9 février 2017
Auditorium Estelle-Laberge
Animateur : Gilles Olivier

ORDRE DU JOUR

JOUR 1

08h30 Introduction et allocution du Directeur régional des Sciences (Yves de Lafontaine)

08h45 Objectifs et résultats attendus de l'atelier (Gilles Olivier)

09h00 Situation actuelle du Programme national d'adaptation aux changements climatiques (Michel Gilbert)

09h20 **Bloc I – Risques aux infrastructures**

1. Estimation des niveaux d'eau extrêmes dans un contexte de changements climatiques (Denis Gilbert/Denis Lefaivre)
2. Simulation à long terme et bases de données sur les ondes de tempête dans un contexte de changement climatique (Zhigang Xu)

Discussion en plénière (conclusions et implications pour les clients régionaux)

10h15 Pause

10h30 **Bloc II – Modélisation/impacts physiques et chimiques des changements climatiques**

3. Modélisation du climat océanique physique future dans le golfe du Saint-Laurent (Joël Chassé, région du Golfe)
4. Modélisation biogéochimique des impacts des changements climatiques dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (Diane Lavoie)
5. Impacts des changements climatiques sur l'oxygène dissous dans les chenaux profonds du golfe du Saint-Laurent (Denis Gilbert)
6. Impacts des changements climatiques sur les conditions de glace dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (Peter

Galbraith)

Discussion en plénière (conclusions et implications pour les clients régionaux)

12h00 Diner

13h00 **<u>Bloc III – Impacts des changements climatiques sur les ressources marines</u>**

7. Effets de l'acidification sur la productivité primaire dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (Michel Starr)
8. Effets de l'acidification sur la crevette nordique dans l'écosystème marin du Saint-Laurent (Denis Chabot)
9. Impacts des conditions chaudes observées en 2012 – un avant-goût des changements climatiques? (Stéphane Plourde)
10. Habitat optimal et impacts des changements climatiques sur la distribution des espèces pélagiques (Stéphane Plourde)
11. Impacts des changements climatiques sur la productivité du crabe des neiges (Bernard Sainte-Marie)

Pause

12. Modélisation des impacts des changements climatiques sur la productivité de la morue (Doug Swain/Yvan Lambert)
13. Effets des changements climatiques sur le phoque du Groenland de l'Atlantique Nord-Ouest (Mike Hammill) ANNULÉE

Discussion en plénière (conclusions et implications pour les clients régionaux)

16h30 Fin de la première journée

<u>JOUR 2</u>

08h30 **<u>Bloc IV – Outils d'adaptation aux changements climatiques</u>**

14. Modèles numériques de terrain haute-résolution en zone intertidale et peu profonde (Louis Maltais)
15. Projection des conditions biogéochimiques futures via la modélisation (Diane Lavoie)
16. Date de début de la migration printanière du homard dans un contexte de changements climatiques (Peter Galbraith)
17. Vulnérabilité des espèces commerciales (turbot, crevette nordique, morue) aux changements de température et de l'oxygène dissous découlant des changements climatiques dans le Saint-Laurent marin (Denis Chabot/Claude

Savenkoff)

Discussion en plénière (conclusions et implications pour les clients régionaux)

10h15 Pause

10h30 **<u>Bloc V – Implications des résultats du programme pour les clients régionaux</u>**

Quels constats peut-on tirer de l'ensemble de ces travaux? (Plénière)

Synthèse des implications pour les clients régionaux et leurs enjeux respectifs (Infrastructures et sécurité de la navigation)

- Ports pour petits bateaux (PPB)
- Garde Côtière Canadienne (GCC)

Synthèse des implications pour les clients régionaux et leurs enjeux respectifs (Ressources et écosystème)

- Direction régionale de la gestion des écosystèmes (DRGÉ)
  - Gestion des espèces en péril
  - Gestion des océans
  - Protection des pêches
- Direction régionale de la gestion des pêches (DRGP)
  - Gestion des pêches (Québec)
  - Secteurs maritimes

12h00 Dîner

13h00 **<u>Bloc VI – Planification du renouvellement du Programme sur les changements climatiques</u>**

Identification de nouveaux enjeux liés aux impacts et à l'adaptation en lien avec les changements climatiques (plénière)

14h45 Conclusions et prochaines étapes

15h00 Fin de l'atelier

ANNEXE 3 : RÉSUMÉS DES PRÉSENTATIONS[1]

Bloc I – Risques aux infrastructures

Estimation des niveaux d'eau extrêmes dans un contexte de changements climatiques

Blair Greenan[1], Denis Gilbert[2]
[1]Institut Océanographique de Bedford, Nouvelle-Écosse, MPO
[2]Institut Maurice-Lamontagne, Québec, MPO

La présentation des résultats a été faite par Denis Gilbert qui n'avait pris part qu'aux étapes initiales de planification de ce projet PSACCMA, sans être directement impliqué dans l'exécution des travaux. Le principal objectif du projet consistait à développer un outil de planification permettant à Ports pour Petits Bateaux (PPB) et à Biens Immobiliers, Environnement, Sécurité et Santé (BIESS) de tenir compte de la hausse du niveau relatif de la mer dans l'entretien et la construction de leurs infrastructures respectives. Plus spécifiquement, le projet visait à fournir des estimations quantitatives de tolérances verticales à une cinquantaine de sites à travers le Canada pour lesquels nous disposions de données de marégraphe et/ou GPS de qualité suffisante. Dans le cadre de ce projet, la tolérance verticale est définie comme le niveau vertical auquel un actif doit se trouver pour maintenir la même fréquence d'inondations que celles que l'emplacement a connues dans le passé récent.

De 1930 à 1992, le niveau moyen mondial de la mer a monté au rythme de 1.2 mm/année. De 1993 à 2015, période pour laquelle nous disposons de données plus fiables du niveau moyen mondial de la mer grâce aux satellites Topex/Poseidon, Jason-1, 2 et 3, le rythme de la hausse fut plus rapide à environ 3.2 mm/année. Les modèles de simulation par ordinateur du réchauffement climatique prévoient que la hausse du niveau de la mer sera plus rapide dans les prochaines décennies, la valeur de ces prédictions étant de plus en plus élevée selon que l'on passe du scénario RCP2.6 (réductions très rapides et drastiques d'émissions de CO_2) au scénario RCP4.5 (réductions importantes d'émission de CO_2) ou encore au scénario RCP8.5 où la société continue ses patrons actuels d'émissions de CO_2, sans mesures d'atténuation agressives.

Puisque les émissions de CO_2 actuelles sont davantage conformes au scénario RCP8.5 qu'aux deux autres scénarios (RCP2.6, RCP4.5), seuls les résultats pour RCP8.5 sont présentés en mettant davantage l'emphase sur les sites qui sont d'un intérêt particulier pour la région du Québec. Afin de maintenir la même fréquence d'inondation en 2050 que celles connues dans le passé récent, les tolérances verticales estimées par Zhai *et al.* (2015) sont de 0.44 m à Cap-aux-Meules, 0.08 m à Harrington Harbour, 0.17 m à Lauzon, 0.20 m à Rimouski, 0.34 m à Rivière-au-Renard, 0.24 m à Sainte-Anne-des-Monts et 0.13 m à Sept-Îles. Afin de

[1] Le soulignement des noms de certains auteurs désigne le présentateur durant l'atelier.

maintenir la même fréquence d'inondation en 2100 que celles connues dans le passé récent, les tolérances verticales estimées par Zhai *et al.* (2015) sont de 1.24 m à Cap-aux-Meules, 0.42 m à Harrington Harbour, 0.68 m à Lauzon, 0.83 m à Rimouski, 1.11 m à Rivière-au-Renard, 0.91 m à Sainte-Anne-des-Monts et 0.65 m à Sept-Îles.

Propositions de recherche/Priorités :

- Réviser les estimations de tolérance suite à la sortie du cinquième rapport du *Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* (GIEC) où de nouvelles études suggèrent une accélération de la hausse du niveau de la mer, notamment en raison de nouvelles instabilités dans la calotte glaciaire de l'Antarctique.

Référence :

Zhai, Li, Blair J.W. Greenan, John Hunter, Thomas S. James, Guoqi Han, Phillip MacAulay et Joseph A. Henton. 2015. Estimating Sea-Level Allowances for Atlantic Canada using the Fifth Assessment Report of the IPCC, Atmosphere-Ocean, 53: 476-490, doi: 10.1080/07055900.2015.1106401

Simulation à long terme et bases de données sur les ondes de tempête dans un contexte de changements climatiques

Zhigang Xu, Denis Lefaivre, Michel Beaulieu, Sandy Gregorio
Institut Maurice-Lamontagne, Québec, MPO

L'objectif de ce projet est de fournir des résultats en climat futur aux gestionnaires d'ouvrages côtiers, soit à la Direction des Ports pour petits bateaux et au Service hydrographique du Canada du MPO ou à l'externe pour le compte du Ministère des Transports du Québec et du Ministère de la sécurité publique du Québec. Le Service hydrographique du Canada est notre principal collaborateur.

Plus spécifiquement, ce projet vise à fournir une base de données des ondes de tempêtes à une série de stations côtières, calculées avec des résultats de modèles atmosphériques climatiques selon différents scénarios. Pour le réaliser, il a d'abord fallu choisir les stations côtières selon les besoins des clients et avec les contraintes du modèle et de la disponibilité des stations d'observation. Le travail s'est fait en trois étapes : a) assembler les résultats des modèles atmosphériques climatiques selon les différents scénarios d'émission de CO_2 jusqu'en l'an 2100; b) utiliser les forçages atmosphériques climatiques pour calculer les ondes de tempêtes aux stations sur la côte de l'est du Canada; c) utiliser la méthode d'analyse des valeurs extrêmes des ondes de tempête pour obtenir les périodes de retour des hauts niveaux d'eau.

La méthode utilisée pour calculer les ondes de tempêtes est la méthode de régression All-Source Green Function (Xu *et al.* 2015). Les simulations climatiques utilisées ont utilisé les trois scénarios d'émission de CO_2 suivants : RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5 du Community Climate System Model (CCSM, Global).

Propositions de recherche/Priorités :

- Étendre ce travail aux autres côtes du Canada, soit à l'Ouest, dans l'Arctique et dans les Grands Lacs.
- Reprendre ce travail avec les plus récentes simulations climatiques MRCC5 basé sur CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 du World Climate Research Programme).

Références associées :

Zhai L., Greenan, B., Hunter, J., James, T.S., Han, G., Thomson, R. et MacAulay, P. 2014. Estimation des tolérances du niveau de la mer pour les côtes canadiennes et adjacentes des États-Unis à l'aide du cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernementaux sur l'évolution du climat. Rapp. Tech. can. hydrogr. sci. ocean. 300: v + 146 pp.

Xu, Z., Savard, J.-P. et Lefaivre, D. 2015. Data Assimilative Hindcast and Climatological Forecast of Storm Surges at Sept-Iles with an ASGF Regression Model. Atmosphere-Ocean, **53** (5): 464-475. doi: 10.1080/07055900.2015.1079774

Bloc II – Modélisation des impacts physiques et chimiques des changements climatiques

Modélisation du climat océanique physique futur dans le golfe du Saint-Laurent

Joël Chassé
Institut Maurice-Lamontagne, Québec, MPO

Les derniers résultats d'un système de régionalisation du climat océanique pour le golfe du Saint-Laurent (GSL) ont été présentés. Le système est constitué d'un modèle atmosphérique, d'un modèle hydrologique et du modèle couplé océan-glace NEMO.

Onze simulations de 130 ans (1970-2100) de la dynamique de l'océan ont été faites sous les scénarios climatiques A1B, RCP4.5 et RCP 8.5. Les résultats des simulations ont été regroupés par scénario pour montrer la variance des projections à l'intérieur d'un même scénario. Les résultats ont été présentés pour les scénarios A1B et RCP8.5 seulement.

La décharge de l'eau douce est l'un des forçages importants de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent et les prédictions du modèle hydrologique montrent que la quantité totale d'eau qui se déversera dans le système augmentera de près de 2000 m^3/s entre 2020 et 2070. Cette augmentation de l'apport d'eau douce affectera les propriétés physiques du système. Un des principaux résultats du système de régionalisation est qu'il y a une variabilité spatiale significative des changements projetés à l'échelle du GSL avec certaines régions se réchauffant plus vite que d'autres. Des séries temporelles de la température de surface montrent que le GSL, sous le scénario A1B, se réchauffe à un taux moyen de 1.5°/100 ans en hiver, 2.8 °/100 ans au printemps, 3.5°/100 ans en été et 2.9°/100 ans en automne. Les taux de réchauffement de la surface de l'océan sont plus grands sous le scénario RCP8.5 avec des valeurs de 2.0°/100 ans en hiver, 3.8°/100 ans au printemps, 4.9°/100 ans en été et 3.5°/100 ans en automne. Au fond, le système de modélisation projette des taux de réchauffement annuel moyens de 2.5°/100 ans sous le scénario A1B et 3.8°/100 ans sous le scénario RCP8.5.

La surface et le volume maximaux de glace diminueront continuellement jusqu'en 2100, mais il y aura encore de la glace qui se formera dans les régions côtières en hiver.

Dues à une augmentation de la décharge de l'eau douce et une redistribution de son cycle annuel, les salinités de surface diminueront dans le GSL excepté à court terme en été. Les taux moyens de rafraîchissements sont de -1.2 psu/100 ans sous le scénario A1B et -1.8 psu/100 ans sous le scénario RCP8.5. La diminution de la salinité sera principalement marquée dans l'estuaire du Saint-Laurent en hiver. Due à l'augmentation de la température et à la diminution de la salinité plus

marquée en surface qu'au fond, la stratification (0-50m) augmentera avec un changement maximal en été et un changement minimal durant l'automne.

Les résultats du système de régionalisation sont appliqués pour différents projets reliés aux pêches et à l'écosystème. Entre autres, l'indice de l'habitat thermique favorable au crabe des neiges (espèce d'eau froide) dans le sud du GSL est appelé à décroître continuellement dans le futur avec une accélération de cette décroissance à partir de 2040, temps auquel l'indice aura diminué de près de moitié par rapport à l'habitat actuel. À l'opposé, l'indice de l'habitat thermique du homard (espèce d'eau plus tempérée) augmentera progressivement durant la même période.

Propositions de recherche/Priorités :

- Poursuivre la régionalisation des simulations globales afin de préciser l'enveloppe des prédictions.
- Améliorer les modèles hydrologiques et incorporer des scénarios d'utilisation future de l'eau douce afin de mieux cerner ces impacts à long terme.
- Incorporer le régime des vagues dans les modèles.
- Étudier l'impact sur les milieux côtiers (baies et petits estuaires).

Impacts des changements climatiques sur la biogéochimie dans le nord-ouest de l'Atlantique

Diane Lavoie
Institut Maurice-Lamontagne, Québec, MPO

L'objectif ultime de ce projet est de développer un modèle régional du climat qui incorpore la biogéochimie pour fournir une analyse spatiale détaillée des conditions biogéochimiques futures pour le golfe du Saint-Laurent (GSL) et le plateau Néo-Écossais. Ces régions sont sujettes à différentes influences locales (ex. débit d'eau douce, vent) et externes via la circulation océanique et la composition biogéochimique des différentes masses d'eau. Pour bien représenter les conditions biogéochimiques à long terme, il est nécessaire de bien évaluer les conditions futures aux frontières de notre modèle régional. Ces conditions futures sont construites à partir d'une climatologie à laquelle les tendances futures obtenues de différents modèles globaux du climat sont ajoutées. Dans cette présentation, nous analysons les tendances obtenues de 8 modèles globaux (CanESM2, GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MPI-ESM-LR, NorESM1-ME, CNRM-CM5, CESM1-BGC). Les modèles globaux présentent des tendances robustes à la baisse pour les prochaines 50 années pour le nitrate, l'oxygène et le pH pour les eaux qui influencent le golfe du Saint-Laurent. Toutefois, pour les eaux qui influencent le plateau Néo-Écossais, les tendances sont plus variables et les résultats du modèle régional du climat auront une plus grande incertitude dans cette région.

Propositions de recherche/Priorités :

- Acquérir une meilleure compréhension des facteurs affectant la variabilité saisonnière et inter-annuelle des concentrations en oxygène dissous, du pH et des états de saturation pour le carbonate de calcium.
- Améliorer les conditions frontières pour le carbone inorganique dissous.
- Calculer l'alcalinité plutôt qu'utiliser une relation salinité-alcalinité.
- Inclure l'effet de la température sur les processus biologiques.
- Mieux documenter les changements dans les vents et la circulation océanique.

Référence associée :

Lavoie, D., N. Lambert, S. Ben Mustapha and A. van der Baaren. 2013. Projections of future physical and biogeochemical conditions in the Northwest Atlantic from CMIP5 Global Climate Models. Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci. 285: xiv + 156 pp.

Impacts des changements climatiques sur l'oxygène dissous dans les chenaux profonds du golfe du Saint-Laurent

Denis Gilbert
Institut Maurice-Lamontagne, Québec, MPO

Parmi les impacts prévus du réchauffement climatique causé par l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, il y a notamment une tendance à la baisse des teneurs en oxygène dissous dans les océans. Cette présentation n'est pas issue d'un projet financé par le PSACCMA. Elle vise essentiellement à attirer l'attention des gestionnaires du MPO sur le phénomène de désoxygénation future accélérée des océans, compte tenu des niveaux actuels d'hypoxie dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (EGSL) qui sont déjà suffisamment sévères pour avoir des impacts mesurables sur la distribution spatiale d'espèces plus sensibles à l'hypoxie telles que la morue, par exemple.

Des travaux récents en modélisation du système climatique de la Terre avec une taille de grille océanique de 10 km indiquent que la région située près du talus continental et à l'ouest de la queue des Grands Bancs de Terre-Neuve connaîtrait un réchauffement et une désoxygénation des eaux beaucoup plus prononcés que la moyenne mondiale. Puisque l'embouchure du chenal Laurentien se trouve justement dans cette région, les eaux profondes du golfe du Saint-Laurent connaîtraient par conséquent un réchauffement et une désoxygénation plus prononcés que la plupart des autres régions de l'océan mondial au cours des prochaines décennies. Les impacts les plus importants de l'hypoxie se feront sentir dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent, dans le nord-ouest du golfe du Saint-Laurent ainsi qu'aux têtes des chenaux Esquiman et Anticosti où des seuils critiques de tolérance à l'hypoxie seront franchis chez certaines espèces.

Propositions de recherche/Priorités :

- Examiner les conséquences de l'hypoxie sur de nouvelles espèces d'importance commerciale ou écosystémique.
- Quantifier les biais systématiques de température, salinité et oxygène dissous des modèles issus de CMIP6 dès que ceux-ci seront disponibles. (vers 2018).

Impacts des changements climatiques sur les conditions de glace dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent

Peter Galbraith, Caroline Sévigny et Paul Nicot
Institut Maurice-Lamontagne, Québec, MPO

Ce projet avait pour objectif principal de déterminer (1) les rôles de l'état initial de l'océan en automne en termes de quantité de chaleur présente versus (2) les processus de flux de chaleur pour extraire la chaleur de l'eau envers la création (ou non) et l'ampleur du couvert de glace en hiver. L'objectif spécifique était d'évaluer la persistance des glaces côtières (bathymétrie 0-30 m) en comparaison avec le couvert de glace au large, face au réchauffement climatique.

Nous avons converti les cartes quotidiennes et hebdomadaires du Service canadien des glaces sur une grille à 1 km de résolution sur laquelle nous avons la bathymétrie. À partir de ces cartes, des nouvelles climatologies et cartes de conditions extrêmes ont été créées pour illustrer les dates de première et de dernière occurrence de glace, ainsi que la durée du couvert de glace. Les conditions extrêmes sont importantes à considérer pour les besoins à long terme de la Garde côtière canadienne. Des cartes de conditions annuelles et d'anomalies sont, depuis, produites à chaque année (en plus de divers nouveaux produits sur l'état et la progression saisonnière des glaces) et sont incluses dans un document de recherche publié annuellement sur les conditions océanographiques physiques du golfe du Saint-Laurent.

Le projet a pu conclure que le rôle de l'état initial de l'océan en automne en termes de quantité de chaleur présente n'est pas déterminant du couvert de glace de l'hiver qui suit. Le relevé océanographique d'automne du PMZA communément appelé « prévision des glaces » est donc mal nommé. Par contre, le flux de chaleur à la surface de l'eau intégré de l'automne jusqu'à la fin décembre explique 40 % de la variance interannuelle de l'état final de la couche mélangée hivernale, en ne contribuant seulement qu'à 10 % à 15 % de l'extraction de chaleur totale à la mi-mars. Notre étude a aussi cumulé des estimés de flux de chaleur à la surface de l'eau, de l'automne à mars, et cela expliquait 72 % de la variabilité interannuelle du contenu en chaleur de la couche mélangée hivernale et 89 % de la variabilité interannuelle du volume saisonnier maximal du couvert de glace.

Ce lien fort entre les flux de surface en hiver et les conditions du couvert de glace

se traduit par une forte co-variation (74 à 80 % de la variance expliquée) entre la température de l'air moyenne au-dessus du golfe de décembre à mars et la durée, le volume et l'étendue maximaux du couvert de glace (perte de 17 km^3, de 30,000 km^2 et de 14 jours de saison de glace par 1 °C d'augmentation de température de l'air). Les propriétés maximales sont donc corrélées avec la date de première occurrence de glace, et avec la date où les eaux s'approchent du point de congélation (ce qui est monitoré par un thermosalinographe embarqué sur un navire commercial).

À l'échelle du golfe, nous avons vécu presque toute la plage des possibilités de couvert de glace durant les dernières décennies. En 2010, une anomalie de température de l'air de +4 °C a laissé le golfe presque libre de glace. Par contre, la partie côtière moins profonde (0-30 m) est demeurée légèrement englacée pendant 2 mois. Alors que les eaux de la partie profonde du golfe sont libres de glace à partir d'une anomalie de température décembre-mars de l'ordre de + 2,5 °C, les hivers actuels n'ont pas atteint le réchauffement nécessaire pour que le secteur côtier soit entièrement libre de glace. Les eaux côtières (0-30 m) demeurent englacées à cette anomalie de température de l'air, qui sera normale d'ici 40 ans. La région de la cuvette de Mécatina est la moins sensible à l'augmentation de la température de l'air; sa durée de couvert de glace est d'un mois de plus que la moyenne 0-30 m du golfe entier.

Propositions de recherche/Priorités :

- Examiner de façon plus détaillée la zone d'eau chaude souvent présente en hiver à partir de Port aux Basques afin de déterminer s'il s'agit d'un restant de chaleur ou d'un transport venu de l'extérieur du golfe.
- Examiner si les ports sont englacés avant et de façon plus persistante que les régions côtières (0-30 m).
- Vérifier si l'utilisation d'un thermosalinographe pourrait servir au développement d'un indicateur puisque l'état final du couvert de glace semble être bien prédit par la date où la température de l'eau atteint en moyenne 0 °C selon notre étude de flux de chaleur.

Bloc III – Impacts des changements climatiques sur les ressources marines

L'acidification des Océans (AO): Bilan de la situation et les conséquences potentielles sur la productivité de l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent

Michel Starr
Institut Maurice-Lamontagne, Québec, MPO

L'acidification des océans (AO) liée aux émissions anthropiques du gaz carbonique (CO_2) représente une menace pour la santé des écosystèmes marins. Il était donc impératif de connaître l'état de l'AO dans les eaux canadiennes et d'examiner ses effets actuels et futurs sur la faune marine et les processus clés de l'écosystème – les principaux objectifs du présent projet dans le cadre du PSACCMA du MPO. Nos résultats ont montré que l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent font partie des régions les plus vulnérables à l'AO. En particulier, les eaux de fond dans l'ensemble du Saint-Laurent présentent des valeurs de pH beaucoup plus faibles que celles mesurées dans les eaux adjacentes. On y retrouve des valeurs de pH aussi faibles (7.6) que celles prévues à la fin du siècle dans les océans. L'amplification de l'AO dans le Saint-Laurent est attribuée à plusieurs facteurs, notamment : 1) à une plus grande solubilité du CO_2 à basse température, 2) des apports d'eaux douces au pH et au pouvoir tampon plus faibles que les eaux marines et 3) la décomposition ou dégradation des matières organiques marines et terrestres, qui engendre une augmentation de la quantité de CO_2 et une diminution du pH, surtout dans les eaux profondes isolées de l'atmosphère. Ce dernier effet pourrait être aggravé par l'eutrophisation des eaux.

Une des conséquences de l'AO est la diminution des carbonates de calcium qui sont essentiels à plusieurs organismes calcifiés incluant les mollusques, les crustacés, les échinodermes et les coraux. La calcite (la forme la moins soluble des carbonates de calcium, trouvée principalement dans les coccolithophoridés planctoniques et les foraminifères) est en général près de la sous-saturation dans le Saint-Laurent, tandis que l'aragonite (la forme la plus soluble, trouvée principalement dans les échinodermes, les mollusques, les ptéropodes et les coraux) est déjà dangereusement sous-saturée, notamment dans les eaux de fond.

À ces niveaux d'AO, nos travaux expérimentaux sur le pétoncle géant indiquent que les stades larvaires pourraient être négativement touchés. En outre, un pourcentage élevé de larves difformes est observé en laboratoire lorsque les larves du pétoncle géant sont exposées à des niveaux de pH et d'aragonite similaires à ceux retrouvés en milieu naturel. Nos travaux expérimentaux démontrent aussi que l'AO pourrait avoir des conséquences sur la structure des communautés phytoplanctoniques, de même que sur leurs métabolismes et compositions biochimiques - des modifications qui pourraient avoir des conséquences sur la capacité de support du milieu et le transport d'énergie vers le benthos. Par contre, certaines espèces semblent être moins sensibles à l'AO, telles que les diatomées *Thalassiosira spp* ou le copépode *Calanus hyberboreus*.

Ainsi, la réponse des organismes à l'AO varie entre les espèces et pourrait même varier entre les populations, ce qui justifie la poursuite de ces travaux de recherche pour mieux prévoir la réponse de l'écosystème à l'AO. L'interaction entre l'AO et le réchauffement des eaux constitue une question scientifique d'importance puisque nos travaux ont mis en évidence des effets additifs, synergétiques ou antagonistes entre ces deux facteurs de stress.

Propositions de recherche/Priorités :

- Implantation d'un réseau d'observation soutenu et continu de l'AO dans les eaux canadiennes, notamment dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, afin de suivre l'évolution de ce phénomène à court, moyen et long termes.
- Former un groupe de travail sur l'acidification des océans.
- Mieux comprendre les facteurs amplifiant l'acidification dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent et la baie d'Hudson et identifier des stratégies d'atténuation (ex. l'importance de l'eutrophisation, l'origine des eaux, etc.).
- Poursuivre les études de l'effet de l'AO et du réchauffement des eaux sur les processus clés de l'écosystème du Saint-Laurent (productivité primaire [incluant les algues toxiques], productivité secondaire, qualité de la nourriture, etc.), de même que sur les premiers stades larvaires d'organismes calcifiés (stades les plus sensibles à l'AO).
- Améliorer les prévisions de l'évolution future de la chimie des eaux dans le Saint-Laurent par la modélisation biogéochimique régionale à fine échelle.

Effets de l'acidification sur la crevette nordique dans l'écosystème marin du Saint-Laurent

Denis Chabot[1], Tanya Hansen[1], Luc Beaudin[1], Laélien Bassi[1,2], Piero Calosi[3]
[1]Institut Maurice-Lamontagne, Québec, MPO
[2]Université de Lille, Station Marine, Wimereux, France
[3]Département de biologie, Université du Québec à Rimouski

La tolérance de la crevette nordique (*Pandalus borealis*) à l'hypoxie a été mesurée à 2 températures dans le passé (5 et 8 °C), mais au pH normal de l'eau de surface de l'estuaire, soit d'environ 8.0 (Dupont-Prinet *et al.*, 2013). Dans ces conditions, le seuil critique (létal) d'oxygène dissous est de 15.5 et 22.2 % de saturation, respectivement, pour les crevettes femelles, qui sont ciblées par la pêche. Or, les zones hypoxiques de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent ont un pH beaucoup plus bas (environ 7.6 à 7.75) que les eaux de surface et il est possible que le pH ait un impact sur la tolérance à l'hypoxie. L'objectif principal de ce projet était de déterminer s'il y avait une interaction entre la température et le pH pour la tolérance à l'hypoxie des crevettes femelles. Pour ce faire, des crevettes femelles ont été exposées à des températures de 3, 6, 9, 12 ou 15 °C et des pH de 8, 7.75 et 7.55 pendant au moins 4 semaines. Les crevettes exposées à une température de 15 °C n'ont pas survécu 4 semaines et les trois traitements à 15 °C sont exclus des

résultats. La tolérance à l'hypoxie a diminué (c.-à-d., le seul létal a augmenté) à mesure que la température augmentait, passant de 12.5 à 28 % de saturation. Ceci était prévisible, compte tenu de la forte relation entre la température et le taux métabolique. Ainsi, le taux métabolique standard (TMS, le niveau minimal obligatoire de dépenses énergétiques) a lui aussi augmenté continuellement de 3 à 12 °C, passant de 31 à 67 µg O_2 h^{-1} g^{-1}. Cependant le pH a rendu les crevettes moins tolérantes à l'hypoxie à 3 et 6 °C, le seuil létal augmentant d'environ 5 % de saturation à chacune de ces températures. Le pH n'a pas influencé la tolérance à l'hypoxie aux températures plus chaudes. Les raisons demeurent à être élucidées avec des expériences complémentaires.

Cette étude démontre que les effets de l'hypoxie sur le terrain peuvent être sous-estimés si les autres stresseurs auxquels font face les animaux sont négligés. Nos résultats suggèrent que les températures et niveaux de pH projetés pour l'estuaire d'ici 2060 pourraient bien être des conditions létales pour les crevettes nordiques femelles et cette population ne serait plus viable commercialement. Par contre, les conditions d'hypoxie et de pH seraient moins sévères dans le golfe et les populations seraient moins touchées par l'hypoxie.

Propositions de recherche/Priorités :

- Évaluer la tolérance à l'hypoxie à des pH plus faibles et pour différentes gammes de températures. On cherche à vérifier l'hypothèse selon laquelle l'acidification semble diminuer la tolérance des organismes à l'hypoxie à certaines températures. Actuellement, les études de tolérance à l'hypoxie s'effectuent à un pH normal ce qui n'est pas représentatif des zones hypoxiques où les eaux sont naturellement plus acides.

Références associées :

Dupont-Prinet, A., Pillet, M., Chabot, D., Hansen, T., Tremblay, R. & Audet, C. 2013. Northern shrimp (*Pandalus borealis*) oxygen consumption and metabolic enzyme activities are severely constrained by hypoxia in the Estuary and Gulf of St. Lawrence. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. **448**: 298-307.

Mucci, A., Starr, M., Gilbert, D. et Sundby, B. 2011. Acidification of Lower St. Lawrence Estuary Bottom Waters. Atmosphere-Ocean **49**: 206-218.

Impacts des conditions chaudes observées en 2012 – un avant-goût des changements climatiques ?

Stéphane Plourde
Institut Maurice-Lamontagne, Québec, MPO

Afin de mettre dans un contexte historique à long terme les conditions chaudes observées en 2012 et d'évaluer leurs impacts potentiels sur l'écosystème du golfe du Saint-Laurent, nous avons d'abord décrit les différents modes de variations de l'environnement physique (1971-2012) et biologique (1990-2012) à l'aide

d'analyses en composantes principales (PCA) appliquées à 40 variables. Trois modes principaux de variabilité ont été identifiés (court, moyen et long terme), nos résultats démontrant également des liens forts entre ces variations des conditions physiques et l'abondance, la composition et la phénologie d'espèces clés de zooplancton. Un ensemble de Modèles Additifs Généralisés (GAM) a par la suite permis de décrire le rôle joué par les variations des processus ascendants décrits ci-dessus dans le contrôle de la productivité de plusieurs stocks de poissons pélagiques dans la région. Finalement, une analyse des variations temporelles de quatre indicateurs pouvant potentiellement caractériser la qualité de l'habitat du béluga du Saint-Laurent suggère que cet habitat se serait détérioré au cours des 15 dernières années, ce qui pourrait expliquer une augmentation du taux de mortalité des veaux depuis 2008. Ces travaux démontrent l'importance de considérer les variations du fonctionnement à la base de l'écosystème dans la gestion des ressources et espèces phares dans le Saint-Laurent.

Propositions de recherche/Priorités :

- Programme « Stratégie de Gouvernance Internationale » (SGI) (2016-2019): Understanding the collapse of the mackerel fishery in the northwest Atlantic: relative contribution shifts, fishing pressure and climate-driven changes in productivity (Doniol-Valcroze, Plourde, Castonguay, Kristen).
- Programme « Ecosystem and Fisheries Science Research Fund » (2016-2019): impacts of environmental variability on herring and mackerel stock dynamics and management in the gulf of St. Lawrence (Doniol-Valcroze, Plourde *et al.*).
- « Programme sur les changements climatiques » (PSACCMA) (2016-2018): Using multivariate physical and biological oceanographic indices to assess climate-driven changes in the productivity of commercially and ecologically important pelagic fishes in eastern Canadian waters (Plourde, Johnson, Pepin *et al.*).

Habitat optimal et impacts des changements climatiques sur la distribution des espèces pélagiques

Stéphane Plourde
Institut Maurice-Lamontagne, Québec, MPO

Ce projet avait pour objectif principal de développer une approche statistique afin de quantifier l'impact des changements climatiques sur la distribution et la production des espèces pélagiques. Utilisant les données environnementales et d'abondances de zooplancton récoltées dans le cadre du Programme de Monitorage de la Zone Atlantique du MPO (PMZA), nous avons construit des modèles statistiques de distribution d'espèces clés du zooplancton décrivant les variables physiques et biologiques expliquant leurs variations en abondance à l'échelle des eaux de l'est du Canada. À l'aide de projections futures des variables environnementales identifiées comme étant importantes réalisées avec des

modèles couplés atmosphère-océans développés par le MPO, nous avons pu estimer l'impact potentiel des changements climatiques futurs sur la distribution et l'abondance (productivité) d'espèces clés d'origine arctique (*Calanus glacialis*, *C. hyperboreus*), subarctique (*C. finmarchicus*) et tempérée (*Paracalanus*) de l'écosystème pélagique. Nos résultats ont également démontré l'importance de la qualité de l'échantillonnage du zooplancton dans de telles analyses. L'approche développée est présentement en application sur diverses espèces de poissons pélagiques et constitue également un outil pouvant permettre d'inférer sur les effets potentiels des changements climatiques sur les espèces dépendantes de la productivité du zooplancton.

Propositions de recherche/Priorités :

- Programme « Stratégie de Gouvernance Internationale » (SGI) (2016-2019): Understanding the collapse of the mackerel fishery in the northwest Atlantic: relative contribution shifts, fishing pressure and climate-driven changes in productivity (Doniol-Valcroze, Plourde, Castonguay, Kristen).
- Développer des approches basées sur les optimum physiologiques et les traits du cycle de vie: zooplancton, krill, poissons.
- Acquérir de meilleures données de distribution des poissons pélagiques à l'aide de l'acoustique multifréquence.
- Poursuivre le développement de modèles 3-D couplés biophysiques: important pour les composantes zooplancton et krill (en cours, projet LEP, NSERC).

Impacts des changements climatiques (réchauffement) sur la productivité du crabe des neiges

Bernard Sainte-Marie
Institut Maurice-Lamontagne, Québec, MPO

Le crabe des neiges est une ressource marine adaptée au froid. Ce projet visait à combler des lacunes de connaissances pour comprendre la capacité de l'espèce à se maintenir dans son habitat « traditionnel » face au réchauffement. La présentation a porté principalement sur trois des cinq objectifs du projet : (1) distribution verticale et croissance et survie des larves, (2) croissance et survie des juvéniles et déclencheur de la mue terminale (MT), (3) caractérisation et quantification de l'habitat des stades benthiques. Les connaissances acquises découlent de l'analyse d'échantillons archivés, de travaux de laboratoire et de terrain, et de revues de la littérature.

Il a été démontré que la distribution verticale des larves dans la colonne d'eau est conditionnée par les gradients de densité et de température. Le taux de croissance des larves (et des juvéniles) est très sensible à la température et est modulé avant tout par un changement de la durée de l'intermue, plutôt que de l'accroissement de taille à la mue. La phase larvaire durerait entre 2,5 mois à 12 °C et 8,2 mois à

3 °C. La température a aussi un effet marqué sur la survie des larves, qui serait maximisée autour de 9–12 °C.

Chez les juvéniles, le temps requis pour passer du stade I (3 mm de largeur de carapace) au stade VII (27 mm) serait de 2,3 ans à 3 °C et de 5,7 ans à –1 °C. Le déclenchement de la MT, qui peut survenir dès le stade VIII (37 mm), est partiellement conditionné par la température. La taille médiane à la MT croît avec la température, ce qui a un effet positif sur la fécondité des femelles et sur le pourcentage et le poids médian des mâles qui atteignent la taille légale (95 mm). Par exemple, ce pourcentage et ce poids étaient respectivement de 45 % et 0,56 kg dans l'estuaire du Saint-Laurent (« chaud ») contre seulement 12 % et 0,38 kg dans la fosse de Mécatina (« froid ») de 2000 à 2013.

Dans le golfe Saint-Laurent (GSL), le monitorage a démontré des changements dans la phénologie des larves liés au réchauffement des eaux de surface et une relation négative entre l'abondance des juvéniles et le réchauffement des eaux de surface et de fond, cette dernière étant attribuée à une mortalité larvaire et juvénile accrue. Un indice de l'habitat benthique du crabe des neiges, basé sur les températures préférées, affiche depuis le début des années 1990 une tendance négative dans plusieurs zones de pêche du nord du GSL.

Globalement, le projet a permis de répertorier et dans certains cas de quantifier les facteurs de vulnérabilité (par ex. : contraction d'habitat et mortalité accrue) et de résilience (par ex. : croissance accélérée et plus grande taille à la MT) au réchauffement, pour la prévision des distributions et des structures de tailles futures et l'adoption de mesures de gestion adaptées. Le projet a aussi permis d'identifier certaines pistes de recherche future pour une meilleure compréhension des effets du réchauffement sur la productivité du crabe des neiges.

Propositions de recherche/Priorités :

- Évaluer l'importance relative de la température et de la densité sur le déclenchement de la mue terminale.
- Évaluer le rôle de la thermorégulation comportementale dans la résilience aux changements climatiques.
- Évaluer l'effet de la température sur le nombre et la qualité des œufs (larves)
- Évaluer l'impact de l'acidification sur les larves et juvéniles et de l'hypoxie sur les juvéniles et adultes.
- Évaluer les impacts écosystémiques de l'extension de l'aire de répartition du crabe des neiges dans l'Arctique.

Modélisation des impacts des changements climatiques sur la productivité de la morue

Yvan Lambert[1], Doug Swain[2]

[1]Institut Maurice-Lamontagne, Québec, MPO
[2]Centre des pêches du Golfe, Moncton, MPO

L'objectif principal visé par ce projet est de prédire les impacts potentiels des changements climatiques sur la productivité de la morue en utilisant des modèles bioénergétiques. Une approche utilisant les résultats d'expériences en laboratoire et les séries historiques de données récoltées sur la morue dans le sud et le nord du golfe du St-Laurent a été utilisée pour développer ce modèle. Les résultats de plusieurs expériences en conditions contrôlées sur la croissance et la condition énergétique de la morue atlantique ont été utilisés pour définir des règles de répartition saisonnière de l'énergie consommée entre la croissance, l'accumulation de réserves énergétiques et la reproduction sous différents régimes de température et de ration alimentaire. De façon parallèle, les variations saisonnières et interannuelles dans la condition énergétique et la croissance de la morue dans le sud et le nord du golfe ainsi que les champs de température fréquentés par les morues dans les deux parties du golfe depuis 1991 ont été compilés. Une analyse détaillée du remplissage stomacal et du régime alimentaire en fonction de la saison pour la morue du sud du golfe a également été réalisée. Ces résultats vont alimenter un modèle bioénergétique décrivant la dynamique de croissance de la morue qui sera utilisé comme un outil d'adaptation pour fournir des prévisions à moyen et à long terme des effets des changements climatiques sur la productivité de la morue sous différents scénarios de changements dans l'habitat et la disponibilité des proies, ce qui permettra d'intégrer les effets combinés de changements de régime de température et de ration alimentaire.

Propositions de recherche/Priorités :

- Poursuivre le développement du modèle.
- Développer des indices de la croissance et de la condition de la morue pour mieux ajuster le modèle et le valider.
- Évaluer des scénarios possibles de la productivité future de la morue à partir des modèles climatiques.

Bloc IV – Outils d'adaptation aux changements climatiques

Modèles numériques de terrain haute-résolution en zone intertidale et en eau peu profonde

Frédéric Lavoie, Louis Maltais, Roger Côté
Institut Maurice-Lamontagne, Québec, MPO

L'étude sur l'adaptation aux changements climatiques et leurs effets sur les eaux côtières nécessite une connaissance approfondie des zones intertidales et riveraines. Au Canada, il y a place à amélioration puisque les zones actuelles couvertes par des relevés haute densité sont très limitées. Pour remédier à la situation, le Service hydrographique du Canada (SHC) préconise l'utilisation de technologies aéroportées de type LiDAR (Light Detection and Ranging) qui peut relever rapidement, à une résolution moyenne, de vastes territoires sur les bandes riveraines, terrestres et les zones de faibles profondeurs pouvant atteindre 30 mètres et plus selon les propriétés de l'eau. Il est possible d'obtenir des données à plus grande résolution en utilisant la technologie PhoDAR (Photogrametric Detection and Ranging) qui peut être utilisée à marée basse dans les zones intertidales. Avec ces données géospatiales, des modèles numériques de terrain (MNT) continus, c'est-à-dire sans interruption entre les zones terrestres et marines, sont générés. Ces modèles numériques de terrain peuvent ensuite être utilisés pour modéliser et simuler l'effet de la hausse des niveaux dans les zones côtières à différentes époques et différents événements comme des ondes de tempêtes, des marées exceptionnelles, la hausse du niveau des océans, etc.

L'autre objectif de ce projet était de démontrer que ces données peuvent être mises à la disposition des utilisateurs à partir de l'outil Caris SFE (Spatial Fusion Enterprise). SFE permet de visualiser, interroger, sélectionner et télécharger des données haute définition à partir d'un fureteur internet courant. L'outil permet également de gérer plusieurs systèmes de références verticales et horizontales et divers formats de fichiers courants. Pendant sa période d'opération, 4 jeux de données étaient accessibles et l'outil était en mesure de gérer la conversion et l'extraction de données selon les critères établis par le client. L'outil a été en ligne pendant un certain temps, mais a dû être retiré pour des raisons techniques.

La réalisation de ce projet aura permis au SHC de démontrer qu'il est possible de rendre accessibles de grands volumes de données à partir d'outils couramment utilisés par les usagers. Pour le ministère des Pêches et Océans (MPO) et ses partenaires, l'acquisition et la gestion de données côtières hautes densités permet de prévoir et simuler avec exactitude l'étendue possible des dommages pouvant survenir dans les zones touchées par des événements climatiques extrêmes ou de concevoir adéquatement des projets visant à protéger les infrastructures. La mise en commun des données et des ressources disponibles pour l'acquisition de données géospatiales aéroportées permettrait à tous d'accroître les superficies couvertes, le partage d'information et par le fait même l'amélioration des modèles de prévisions et de simulations en milieu côtier.

Propositions de recherche/Priorités :

- Poursuivre les relevés LiDAR (SHC) dont certains ont déjà été effectués en 2012, 2015 et 2016.
- Essais et mise en opération de la technologie PhoDAR.
- Identifier des opportunités de partenariat pour la collecte de données (ex. identification des zones à protéger par les scientifiques, effet multiplicateur où un jeu de données sert à plusieurs applications, partage des coûts signifie une augmentation de la couverture).
- Rendre les données disponibles aux utilisateurs (DDP, FGP, SFE) et politiques d'accès aux données.

Projection des conditions biogéochimiques futures via la modélisation

Diane Lavoie
Institut Maurice-Lamontagne, MPO

L'objectif ultime de ce projet est de développer un modèle régional du climat qui incorpore la biogéochimie pour fournir une analyse spatiale détaillée des conditions biogéochimiques futures pour le golfe du Saint-Laurent (GSL) et le plateau Néo-Écossais. La Gestion des Écosystèmes a supporté ce projet en vue d'utiliser les résultats pour le développement et le suivi du réseau d'aires marines protégées du GSL. Les capacités du modèle régional pour reproduire les conditions biogéochimiques du golfe du Saint-Laurent et du plateau Néo-Écossais (distribution spatiale des concentrations en oxygène dissous et des états de saturations du carbonate de calcium) ont été démontrées. Les résultats obtenus avec une simulation de 100 ans (1970 à 2070) du modèle régional forcé avec les résultats du modèle global MPI-ESM-LR ajustés à l'échelle du modèle régional ont été présentés. Bien que des différences régionales existent, soit dans le signe ou dans l'ampleur du changement, les résultats montrent : (1) une augmentation de la quantité d'eau douce à la surface qui mène à une diminution de la lumière disponible pour le phytoplancton, (2) une diminution des nitrates disponibles dans la couche de surface liée à une stratification accrue, (3) une diminution des concentrations de phytoplancton, (4) une augmentation des concentrations de nitrate dans les couches profondes, (5) une diminution des concentrations en oxygène dissous, (6) du pH et (7) des états de saturation du carbonate de calcium. L'impact cumulatif des changements (4) à (7) est plus important dans le nord-est du GSL. Il est aussi à noter que pour le nitrate, les projections dans le GSL sont de signe contraire à celles imposées à la frontière du modèle près de l'embouchure du Chenal Laurentien, alors que pour l'oxygène et le pH, la baisse est plus prononcée qu'à la frontière. Ces différences résultent des processus locaux au GSL. Ces résultats sont préliminaires et doivent être analysés plus en détail.

Propositions de recherche/Priorités :

- Avoir une meilleure compréhension du système en ce qui a trait à

l'acidification.

- Améliorer les conditions frontières pour le carbone inorganique dissous.
- Calculer l'alcalinité plutôt que d'utiliser une relation salinité-alcalinité.
- Découplage de l'atténuation de la lumière en fonction de la salinité.
- Explorer les taux de chute et de reminéralisation de la matière organique particulaire (lien avec projet SPERA).
- Explorer les nouvelles conditions frontières avec modèles globaux à plus haute résolution.
- Inclure l'augmentation possible des éléments nutritifs en provenance du Fleuve Saint-Laurent.
- Étudier l'impact de la déposition atmosphérique d'azote qui est en augmentation.

Date de début de la migration printanière du homard dans un contexte de changements climatiques

Peter Galbraith[1], *Mélany Belzile*[1], Sylvette Leblanc[2], André Drapeau[3]
[1]Institut Maurice-Lamontagne, Mont-Joli
[2]Directrice de Secteur, Îles-de-la-Madeleine [Retraitée]
[3]Conseiller en aquaculture, Gestion des pêches et de l'aquaculture, Québec

Ce projet du volet « outils » avait pour objectif principal de déterminer le proxy le plus simple pour prévoir quand la température de l'eau dépassera le seuil de mobilité du homard (~1.5 °C), basée sur le retrait du couvert de glace, la température de l'air ou la température de surface observée par télédétection et ce, pour les zones de pêches des Îles-de-la-Madeleine et de l'Île-du-Prince-Édouard. Les clients étaient la Direction de la gestion des pêches des régions du Québec, du Golfe et des Maritimes, ainsi que la Direction des ports pour petits bateaux, région des Maritimes.

Des données de température des réseaux de thermographes de la Région du Québec et de la Région du Golfe ont été analysées, et quelques nouveaux déploiements effectués. Du côté sud des Îles-de-la-Madeleine, à l'île Shag, un thermographe a été déployé à longueur d'année depuis 1993. Les données indiquent une différence de l'ordre de 6 semaines dans la date du réchauffement printanier entre les extrêmes le plus hâtif (2010) et le plus tardif (2015), et que la variabilité de la date où le seuil de température de 1.5 °C est franchi a un écart-type de 10 jours.

Une analyse a été faite mettant en relation la date du réchauffement printanier des eaux avec la date à laquelle la température de l'air passe au-dessus du même seuil et avec la date du retrait du couvert de glace. Aux Îles-de-la-Madeleine, 70 % des cas sont déterminés par le retrait de la glace qui survient plus tard que le réchauffement de l'air et qui maintient les eaux isolées du réchauffement. En moyenne, le réchauffement des eaux de surface s'y fait 4 jours après le retrait de la glace (É.T. de 4.7 j) ou 8 jours après le réchauffement de la température de l'air

(É.T. de 5.7 j). Ces écarts-types des prévisions sont donc mieux que de se fier uniquement à la date moyenne de réchauffement de l'eau des années antérieures (26 avril, É.T. de 10 j).

Pour le secteur du sud du golfe, 606 séries de thermographes ont été examinées. 139 séries avaient été déployées assez tôt en saison pour capturer la date de réchauffement printanier, et de ceux-ci 31 étaient à une profondeur de 10 m et moins. De ces 31, 81 % des cas de réchauffement ont été déterminés par la température de l'air (qui est survenu plus tard que le retrait de glace). En moyenne, le réchauffement de surface se fait 7 jours soit après le retrait de la glace (É.T. de 10.6 j) soit après le réchauffement de la température de l'air (É.T. de 6.4 j). Le réchauffement des eaux dans ce secteur se fait lors d'une période beaucoup moins étalée qu'aux Îles-de-la-Madeleine, et par conséquent, l'écart-type de la prévision du cas de température de l'air n'est que légèrement mieux que de se fier uniquement à la date moyenne de réchauffement des années antérieures (22 avril, É.T. de 8 j).

En conclusion, la date la plus tardive entre le retrait de la glace et le réchauffement de la température de l'air est un bon indicateur du moment où la couche de surface aura réchauffé. Il faut ensuite ajouter environ 14 j pour retrouver le réchauffement à près de 30 m, là où la pêche débute. Cela nous donne 3 semaines de préavis. Ce proxy pourra être utilisé annuellement de façon opérationnelle pour gérer l'ouverture de la pêche, et appliqué aux scénarios de changements climatiques pour anticiper un devancement éventuel de l'ouverture de la pêche. L'indicateur est utile aux Îles-de-la-Madeleine, car il permet de mieux estimer la date de mobilité qu'une moyenne climatologique. L'indicateur est moins utile dans le sud du Golfe, car la variabilité des dates de réchauffement de l'eau est moins forte, et la variabilité de l'indicateur est plus forte que pour le cas des Îles-de-la-Madeleine.

Propositions de recherche/Priorités :

- Vérifier cette méthode dans d'autres zones de pêches (Gaspésie).
- Intégrer le réchauffement printanier des thermographes de la Région du sud du golfe dans le rapport annuel des conditions océanographiques physiques du golfe Saint-Laurent (ceci est fait depuis 2 ans pour le thermographe de l'Île Shag, IDLM).
- Évaluer la faisabilité du déploiement de thermographes en pré-saison aux IDLM.

Vulnérabilité d'espèces commerciales clés aux changements climatiques

Claude Savenkoff[1], Marie-Noëlle Bourassa[1], Hugo Bourdages[1], Joël Chassé[1], Nicolas Lambert[1], Peter Galbraith[1] et Sandrine Vaz[2]
[1]Institut Maurice-Lamontagne, Mont-Joli
[2]Ifremer, France

Notre contribution à ce projet plurirégional vise l'intégration de paramètres environnementaux et écologiques dans les évaluations de stock de deux espèces d'importance commerciale, le flétan du Groenland ou turbot et la crevette nordique. En plus du turbot et de la crevette nordique, 16 autres espèces sont étudiées en fonction de leur rôle passé et actuel (compétiteur [sébastes, plie canadienne, raies], prédateur [morue, flétan atlantique], ou proie [crevette ésope, motelle à quatre barbillons]) dans l'interaction trophique crevette nordique-turbot. Nos objectifs sont : (1) la cartographie passée et présente de l'abondance et de la biomasse des espèces étudiées, (2) la modélisation de leurs habitats préférentiels basée sur des relations avec les paramètres environnementaux, (3) la simulation des habitats potentiels prédits pour ces espèces suivant différents scénarios de changement global en s'appuyant sur les modèles physiques régionaux de prévision (projections des conditions physiques et biogéochimiques sur les périodes de 10 à plus de 50 ans) et (4) l'estimation des impacts potentiels sur la spatialisation de l'exploitation.

Les distributions de la biomasse de turbot en poids moyen par trait provenant des relevés au chalut de fond du MPO sont relativement similaires à différentes périodes de temps 1990-2003, 2004-2010 et 2011-2016. Même si les valeurs sont différentes en valeurs absolues, les plus fortes valeurs sont retrouvées dans l'estuaire, le nord-ouest de l'Île d'Anticosti et à la tête des chenaux Anticosti et Esquiman (Figure 1). Avec la méthode des kernels, nous avons pu identifier la plus petite aire qui contient > 70 % de la biomasse et la caractériser avec des variables environnementales qui représentent les habitats préférentiels actuels du turbot (ex. température entre 5,0-5,7 °C, Figure 1). À partir des simulations du modèle climatique CANOPA-RCP 8.5, nous constatons que l'habitat présentant les conditions préférentielles actuelles du turbot pourrait fortement diminuer avec le temps (voir étendue de la zone orange, Figure 2). Ainsi, si le réchauffement prédit des eaux profondes se poursuit, des changements importants de la distribution du turbot et de son habitat sont à prévoir à moyen terme entraînant des impacts potentiels sur les flottilles de pêche qui exploitent ce stock dans le golfe du Saint-Laurent. Par contre, nous n'avons pas d'information sur la capacité du turbot à changer d'habitat ou à s'adapter à d'autres conditions environnementales; des études en laboratoire devraient être réalisées. Nos analyses devraient se poursuivre sur l'ensemble des 16 autres espèces. Cela permettrait d'incorporer également de l'information écologique (distributions des proies et des prédateurs) dans notre analyse.

Les résultats seront utilisés dans le cadre des évaluations des stocks des espèces commerciales (crevette nordique, turbot [février 2017], morue, etc.). Les résultats permettront également de faire des recommandations en termes de gestion sur la distribution des espèces étudiées et de leurs habitats ainsi que des impacts potentiels sur les flottilles de pêche qui exploitent ces stocks dans un contexte de réchauffement climatique.

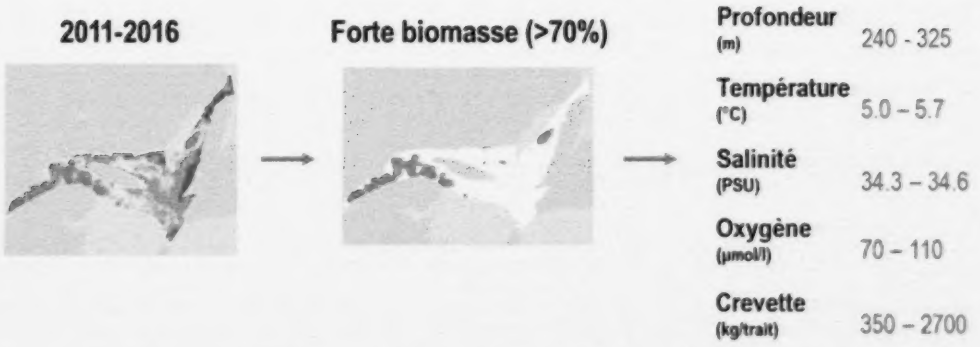

Figure 1. Distribution de la biomasse de turbot (kg/trait) pour la période 2011-2016 dans l'estuaire et le nord du Golfe et caractéristiques environnementales associées aux zones de forte biomasse. Les valeurs les plus fortes sont en rouge et les valeurs les plus faibles en vert foncé. L'ensemble des zones en rouge (panneau du centre) représente la plus petite aire qui contient > 70 % de la biomasse déterminée avec la méthode des kernels. Les données proviennent du relevé plurispécifique estival au chalut de fond effectué en août chaque année depuis 1990 dans l'estuaire maritime et le nord du golfe du Saint-Laurent par le MPO.

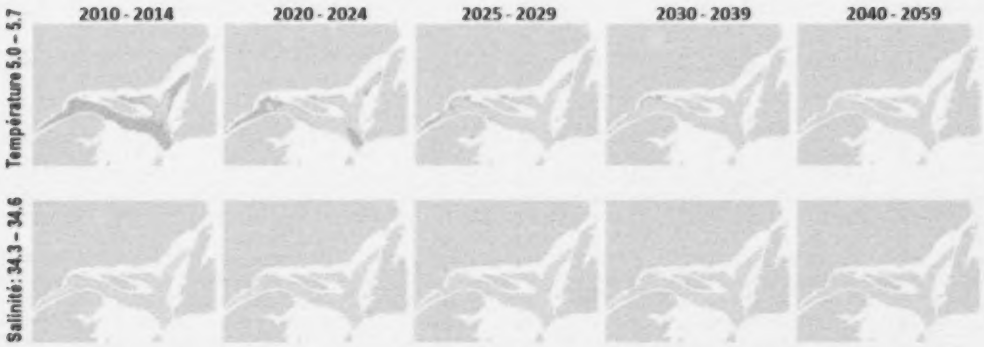

Figure 2. Identification dans les différentes simulations du modèle climatique CANOPA-RCP 8.5 de l'habitat correspondant aux températures 5,0-5,7 °C (en orange, panneaux du haut) et salinité 34,3-34,6 (en vert, panneaux du bas) qui caractérisent les zones de forte biomasse de turbot dans la couche profonde (> 200 m en bleu).

Propositions de recherche/Priorités :

- Poursuivre l'analyse sur l'ensemble des 16 autres espèces sélectionnées en fonction de leur rôle passé et/ou actuel (compétiteur [sébastes, plie canadienne, raies], prédateur [morue, flétan atlantique], ou proie [crevette ésope, motelle à quatre barbillons]) dans l'interaction trophique crevette

nordique-turbot.

- Poursuivre des études en laboratoire pour évaluer le seuil de tolérance ou le pouvoir d'adaptation du turbot à différentes conditions prédites dans le futur par le modèle climatique.

Vulnérabilité d'espèces commerciales clés au réchauffement et à la détérioration des conditions d'oxygène dissous

Denis Chabot[1], *Christine Stortini*[2], *Nancy Shackell*[2]
[1]Institut Maurice-Lamontagne, Québec, MPO
[2]Institut Océanographique de Bedford, Nouvelle-Écosse, MPO

L'objectif principal de cette étude était de déterminer l'impact combiné du réchauffement et de la diminution de l'oxygène dissous (hypoxie plus sévère) pour des espèces commerciales importantes qui utilisent les chenaux profonds de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent. Plus spécifiquement, nous voulions définir mathématiquement le lien entre la température, l'oxygène dissous, la profondeur et l'abondance de 3 espèces (turbot, crevette, morue) dans les relevés des 25 dernières années, ce qui donne les conditions environnementales privilégiées par ces espèces à l'époque actuelle, puis de combiner ces modèles à des projections des conditions futures de température et d'oxygène dissous afin de voir ce qu'il adviendra de la distribution et de l'abondance de ces espèces vers 2046-2060. Les projections de températures proviennent d'un modèle mis au point par Joël Chassé (MPO, Moncton) combiné à un des scénarios de changement climatique considérés par l'IPCC, nommé A1B. Il n'existait pas encore de modèle régionalisé pour projeter des niveaux d'oxygène dissous dans les chenaux profonds pour la période 2046-2060, aussi 3 scénarios ont été considérés, soit une baisse uniforme de 1, 2 ou 4 % de saturation dans toutes les eaux plus profondes que 150 m. Deux scénarios supplémentaires ont aussi été étudiés, soit un réchauffement sans aucun changement d'oxygène dissous, ou une détérioration de 4 % de saturation de l'oxygène dissous, en gardant les températures actuelles.

Le flétan du Groenland est une espèce sténotherme d'eau froide et sa distribution et son abondance seraient considérablement réduites en 2046-2060 selon nos modèles, particulièrement dans les zones où l'espèce est la plus abondante aujourd'hui : dans l'Estuaire, la gyre d'Anticosti, le nord d'Anticosti et la tête du chenal Esquiman. Cependant, les baisses de 2 et de 4 % de saturation en oxygène ont aussi un effet significatif.

Les trois zones d'agglomération de crevettes les plus importantes (nord-ouest du Golfe, nord d'Anticosti et Esquiman) vont subir d'importantes baisses de densité suite au réchauffement, et ces baisses sont plus marquées si elles sont accompagnées de baisses d'oxygène dissous. Des augmentations de densités sont prévues dans des zones moins utilisées en ce moment, comme le chenal Laurentien près du détroit de Cabot, mais aussi l'Estuaire.

La morue serait moins influencée que les deux autres espèces par les changements environnementaux envisagés. La population est concentrée sur les plateaux à moins de 200 m de profondeur depuis l'effondrement qui est survenu au début des années 1990. Les températures y sont présentement froides et l'oxygène dissous est élevé. Les températures projetées sont bien à l'intérieur de la gamme favorable à cette espèce eurytherme et les niveaux d'oxygène dissous y sont élevés. L'espèce est peu présente dans les chenaux hypoxiques, ce qui explique le peu d'effet des baisses d'oxygène dissous en eaux profondes utilisées dans nos modèles.

Nos modèles semblent sous-estimer l'impact des baisses d'oxygène dissous, en particulier dans l'estuaire où l'hypoxie est la plus sévère en ce moment. Les conditions à la fois plus chaudes et plus hypoxiques projetées pour 2046-2060 n'existant pas en ce moment, ces conditions constituent des extrapolations et les conclusions sont toujours moins robustes dans de tels cas. Une nouvelle version des modèles qui tiendrait compte de l'entrée d'eau chaude et hypoxique observée depuis quelques années pourrait les rendre plus réalistes.

Propositions de recherche/Priorités :

- Améliorer la prédiction des modèles quant à l'évaluation des impacts d'eaux chaude et hypoxique sur les espèces étudiées.
- Explorer l'utilisation de nouveaux modèles permettant d'ajouter des connaissances obtenues au laboratoire sur les effets des variations de température, d'oxygène dissous et de pH sur différentes espèces.
- Améliorer les connaissances sur l'influence simultanée de ces trois variables sur les espèces.
- Appliquer ces approches à d'autres espèces commerciales

Référence associée :

Stortini, C. H., Chabot, D. et Shackell, N. L. 2016. Marine species in ambient low -oxygen regions subject to double jeopardy impacts of climate change. Glob. Chang. Biol. *Sous presse*. doi:10.1111/gcb.13534